

Подготовка к ЕГЭ по физике:
Элементы астрономии.
Тохадзе Ирина Константиновна

Методическое замечание 1. С 2018 года в ЕГЭ по физике входит один вопрос, связанный с астрономией, который в кодификаторе называется «Элементы астрофизики». Ответ на него дает учащемуся два первичных бала, что примерно соответствует 3–4 баллам по столбальной шкале. Изучение соответствующих разделов требует изучения достаточно сложного для школьников материала, который традиционно не всегда входит в учебники по физике. Учебники же по астрономии, зачастую, не всегда доступны для восприятия теми учащимися, которые не интересовались предметом ранее самостоятельно. К тому же астрономия активно развивается, и материал многих популярных изданий, на которые также часто ориентируются школьники, не вполне соответствуют современному состоянию науки.

Цель данного методического пособия – кратко представить элементарные знания по небесной механике, физике планет, астрофизике и космологии в доступной для школьника форме, а также дать указания по решению задач ЕГЭ. Стараясь не вдаваться в излишние подробности, хотелось, по возможности, использовать современные данные и актуальные представления астрономической науки. Главы со второй по шестую имеют названия соответствующих тем в кодификаторе [1], однако, основное внимание в пособии уделено вопросам, задачи по которым на ЕГЭ уже встречались.

Значительная часть информации собрана в таблицы для удобства представления данных, а также потому, что условия задач по ЕГЭ содержат таблицы. Для чтения пособия необходимо иметь знания в объеме школьной программы по темам «равномерное движение точки по окружности» [2], «гравитационные силы» [2], «физика ядерного ядра» (особенно то, что касается термоядерных реакций) [3] и «спектры» [3].

1 Основы небесной механики и астрономии

Сначала выведем и рассмотрим некоторые формулы небесной механики. Основная сила, которая действует между небесными телами — гравитационная. Две материальные точки массой m и M по закону Ньютона притягиваются с силой F_N , равной

$$F_N = \frac{GmM}{r^2}. (1)$$

Здесь G — гравитационная постоянная ($6,7 \cdot 10^{-11}$ Н·м²/кг), r — расстояние между материальными точками. Космические тела на космических же расстояниях в большинстве задач можно считать материальными точками. Но если мы находимся на поверхности планеты (будем для определенности говорить именно о планете), то не получится рассматривать планету, как материальную точку. Впрочем, как доказал еще Ньютон, при вычислении гравитационного взаимодействия сферически-симметричной планеты (а в первом приближении Земля именно такая) и материальной точки (небольшого тела, такого как человек) массой m , можно использовать формулу для точечных объектов, считая, что вся масса этой планеты сосредоточена в ее центре. Поэтому сила, с которой небольшое тело массой m , находящееся на поверхности планеты или выше неё, притягивается к планете, равна

$$F_N = \frac{GmM}{r^2}. (2)$$

Здесь M — масса планеты, r — расстояние между телом и планетой, $r \geq R$, где R — радиус планеты. Подставив $r = R$, получим гравитационное взаимодействие планеты и тела на поверхности планеты. Отсюда находим g , которые обычно называют ускорением

свободного падения (но точнее было бы его назвать ускорением силы притяжения, об этом будет сказано ниже):

$$g \equiv \frac{F_N}{m} = \frac{GM}{R^2}. (3)$$

Величину g можно выразить через плотность и радиус планеты. Если известна средняя плотность планеты ρ при использовании формулы для объема шара, для g получим

$$g = \frac{4\pi G\rho R}{3}. (4)$$

С величиной g связана первая космическая скорость v_1 — минимальная скорость, которую надо сообщить телу на поверхности планеты, чтобы оно начало движение по орбите вокруг планеты. Для того чтобы найти v_1 , сначала рассмотрим какую орбитальную скорость v имеет тело, вращающееся по круговой орбите произвольного радиуса r вокруг планеты. При этом тело будет иметь центростремительное ускорение $a_{\text{цс}}$

$$a_{\text{цс}} = \frac{v^2}{r}. (5)$$

Напишем второй закон Ньютона, используя это значение ускорения

$$F = ma_{\text{цс}} = \frac{mv^2}{r}. (6)$$

Подставим силу из формулы (1)

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{GMm}{r^2}. (7)$$

Получим квадрат скорости

$$v^2 = \frac{GM}{r}. (8)$$

Осталось только учесть, что минимально возможный радиус орбиты — это радиус планеты R . Подставив в (8) $r = R$, с учетом формулы (3), получим для первой космической скорости

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R}} = \sqrt{gR}. (9)$$

Более интересной для нас является вторая космическая формула скорость v_2 или «скорость убегания». Это минимальная скорость, которой должно обладать тело на поверхности планеты, чтобы оно смогло преодолеть поле тяготения планеты по инерции.

Для вычисления этой величины надо знать потенциальную энергию гравитационного взаимодействия тел (находящихся вне планеты) и планеты $E_{\text{пот}}$. На расстоянии r от центра планеты она равна

$$E_{\text{пот}} = \frac{-GMm}{r}. (10)$$

При таком определении потенциальной энергии $E_{\text{пот}}$, ее нулевое значение соответствует ситуации, когда два тела расположены бесконечно далеко и гравитационного взаимодействия между ними нет.

Если тело имеет вторую космическую скорость, вся его начальная кинетическая энергия будет потрачена на работу по преодолению гравитационного взаимодействия, то есть на увеличение потенциальной энергии:

$$\frac{mv_2^2}{2} = \Delta E_{\text{пот}} = 0 - \left(\frac{-GMm}{R} \right). (11)$$

Отсюда, учитывая (3), получим

$$v_2 = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \sqrt{2gR}. (12)$$

Из формулы (9) и (12) ясно, что первая и вторая космические скорости связаны простым соотношением

$$v_2 = \sqrt{2}v_1. (13)$$

Теперь рассмотрим движение планет (а также других объектов) по орбитам вокруг Солнца. Эти движения достаточно точно описываются тремя законами Кеплера. **Первый закон Кеплера** (рис. 1) говорит, что планеты движутся по эллиптическим орбитам, а Солнце находится в одном из двух фокусов эллипса.

Эллипс – замкнутая кривая на плоскости. Если у окружности есть центр, то у эллипса есть две точки, которые называют фокусами. Эллипс представляет собой совокупность точек, для которых сумма расстояний до фокусов постоянна. У эллипса выделяют большую полуось a и малую полуось b (рис. 1). Важной характеристикой эллипса является **эксцентриситет**:

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}. (14)$$

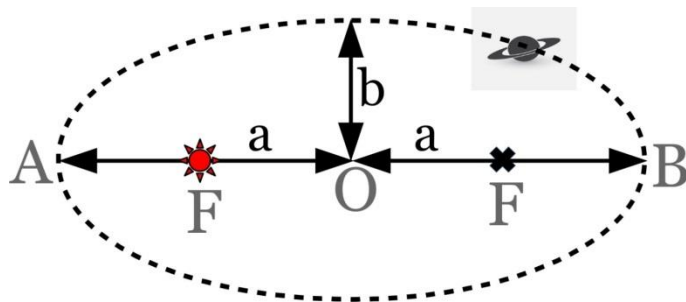


Рис. 1. Первый закон Кеплера. Большая полуось a ($a=AO=OB$), малая полуось b . Обозначены два фокуса F .

При круговой орбите эксцентриситет $e = 0$, а при эллиптической $0 < e < 1$. Чем больше эксцентриситет, тем более вытянут эллипс.

Второй закон Кеплера гласит, что за равные промежутки времени радиус-вектор, соединяющий Солнце и планету, заметает собой равные площади. Из него следует, что

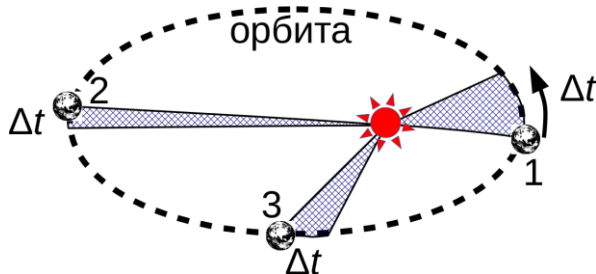


Рис. 2. Второй закон Кеплера. За промежуток времени Δt радиус-вектор заметает в моменты времени 1, 2, 3 одинаковые (заштрихованные) фигуры.

чем дальше в какой-то момент времени планета находится от Солнца, тем меньше ее орбитальная скорость (см. рис. 2). Второй закон Кеплера – следствие более глобального физического закона – «закона сохранения момента импульса».

Третий закон Кеплера относится уже к разным планетам. Он гласит, что квадраты периодов обращения вокруг Солнца T_I и T_{II} двух планет относятся между собой как кубы больших полуосей a_I и a_{II} их орбит:

$$\frac{T_I^2}{T_{II}^2} \sim \frac{a_I^3}{a_{II}^3}. (15)$$

Докажем это утверждение для круговых орбит. Разумеется, все предыдущие рассуждения о телах и планетах, можно применить к планетам Солнечной системы. Воспользуемся формулой (8) и используем ее для двух планет, находящихся на орбитах r_I и r_{II} и имеющих скорости v_I и v_{II} , соответственно (напомним, M – масса Солнца),

$$\frac{v_I^2}{v_{II}^2} = \frac{GM}{r_I} / \frac{GM}{r_{II}}. (16)$$

Упростим формулу (16):

$$\frac{v_I^2}{v_{II}^2} = \frac{r_{II}}{r_I}. (17)$$

Теперь перейдем к соотношению для периодов, используя формулы для связи циклической частоты ω и орбитальной скорости v (линейной скорости планеты на орбите)

$$v = \omega \pi r, (18)$$

а также используем связь периода T и циклической частоты ω

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. (19)$$

Тогда из формулы (17) получим соотношение пропорциональности

$$\frac{T_I^2}{T_{II}^2} \sim \frac{r_I^3}{r_{II}^3}. (20)$$

Выражение (20) является частным случаем третьего закон Кеплера. Для круговых орбит формула (15) перейдет в формулу (20).

Уточнение 1. Конечно, законы Кеплера выполняются не только для планет, но и для самых разных тел (астероидов, комет), если они движутся вокруг Солнца по замкнутым орбитам. Верны эти законы и для всех спутников заданной планеты, в том числе для искусственных аппаратов и ракет, летящих по инерции. Можно обобщить первый и второй законы Кеплера так, что они будут верны и для тел, движущихся по незамкнутым орбитам (такими телами, являются, например, некоторые кометы, космические зонды «Вояджер-1» и «Вояджер-2», которые летят так, что навсегда покинут Солнечную систему).

Историческая справка 1. В XVII веке немецкий ученый Иоганн Кеплер выполнил обратную задачу той, что мы проделали выше — нашел три своих закона, исходя из оптных данных о движении планет с точки зрения земного наблюдателя. Уже потом Ньютон вывел свой закон гравитации (1), зная законы Кеплера. Кеплер проделал очень сложную работу, так как в его время не было не только каких-либо счетных машин, но даже подходящих математических методов. Так, в частности, еще не было придумано дифференцирование и интегрирование.

Уточнение 2. Строго говоря, формула (15) не совсем точная, в ней следовало бы учитывать также движение центрального тела под действием массы тела, вращающегося вокруг. Но так как массы всех планет много меньше массы Солнца, а массы большинства спутников много меньше масс планет, соотношение (15) выполняется с большой точностью. Для более точных расчетов также следует также учитывать влияние на орбитальное движение прочих тел (особенно соседних планет). В ряде случаев необходимо от использования ньютоновской механики переходить к использованию эйнштейновской теории относительности.

Уточнение 3. Обратите внимание, что в формуле (4) введено ускорение силы притяжения, а не ускорение свободного падения. Земля вращается вокруг своей оси, поэтому система отсчета, связанная с ее поверхностью является неинерциальной системой отсчета. Удобно перейти в систему отсчета связанную с центром Земли, которую уже можно считать инерциальной. Тогда все тела, находящиеся на поверхности планеты, имеют центростремительное ускорение $a_{цс}$, направленное к оси планеты (рис. 3)

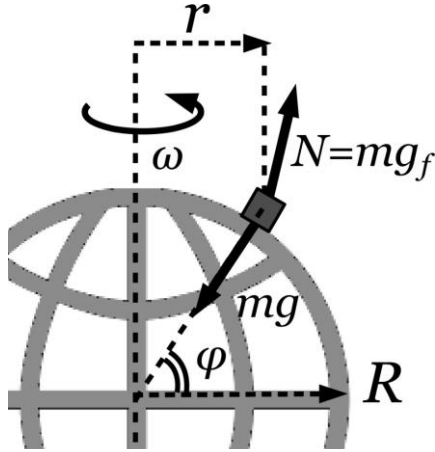


Рис. 3. Силы, действующие на тело на вращающейся планете

$$a_{цс} = \omega^2 r. (21)$$

Здесь r — расстояние до оси вращения планеты, $r = R \cos \varphi$, где R — радиус планеты. Очевидно, что r максимально на экваторе.

На тело на поверхности планеты действует сила тяжести $m\vec{g}$ и сила реакции опоры \vec{N} (рис. 3). По второму закону Ньютона сумма сил, действующих на тело, равна ускорению, в данном случае центростремительному ускорению:

$$m\vec{a}_{цс} = m\vec{g} + \vec{N}. (22)$$

Вес тела P равен, по третьему закону Ньютона, величине силы реакции опоры N . Этот вес и определяет «ускорение свободного падения» g_f — именно его мы и можем определить из опыта, находясь в какой-либо точке Земли. Запишем по определению:

$$P = N \equiv mg_f. (23)$$

Величина g_f постоянна в каждой точке поверхности планеты, но g_f заметно различается для экватора и полюса. Для экватора вес равен

$$P \equiv mg_f = (g - a_{цс})m = m(g - \omega^2 R). (24)$$

Чем быстрее вращается планета, чем больше разница между g и g_f . Кроме того вращение планеты приводит к тому, что она не является правильным шаром, а сплюснута на полюсах.

Для измерения в астрономии нужны величины, сравнимые с астрономическими масштабами. Для расстояний в Солнечной системе удобно использовать астрономическую единицу (а.е.= $150 \cdot 10^6$ км). Для межзвездных расстояний используют парсек (1 пк = $206 \cdot 10^3$ а.е.= $3 \cdot 10^{13}$ км) и световой год (1 св. г.= $63,1 \cdot 10^3 = 5,81 \cdot 10^{15}$ км; 3,26 св.г.=1пк). Массу часто измеряют в массах Земли ($5,97 \cdot 10^{24}$ кг) или Солнца ($1,99 \cdot 10^{30}$ кг).

Еще одной важной величиной в астрономии является яркость объекта (или его блеск), описываемая через **видимую звездную величину**. Поток энергии, который попадает в точку наблюдения от некоторого светящегося объекта, будет разным в зависимости от того, насколько мощно объект излучает энергию в пространство и от того, как далеко он расположен. Плотность этого потока энергии называется «освещённость».

Если два объекта создают в заданной точке освещенность E_1 и E_2 , их звездные величины m_1 и m_2 связаны следующими соотношениями

$$E_1/E_2 = 2,512^{m_1-m_2}, \quad (25)$$

$$\lg(E_1/E_2) = -0,4(m_1 - m_2). \quad (26)$$

Шкала звездных величин логарифмическая и обратная. Яркие объекты имеют отрицательную видимую звездную величину (ее иногда называют просто звездной величиной). Чем более тусклым является объект, тем больше его звездная величина. **Уменьшение видимой звездной величины на 5 единиц, означает увеличение освещенности, создаваемой объектом, (яркости объекта) в 100 раз.** Человек с хорошим зрением может увидеть звезды до 5–6 величины, орбитальному телескопу Хаббл доступны объекты на небе до 30 звездной величины. Самым ярким объектом на небе является, очевидно, Солнце. Его видимая звездная величина -26,8. Максимальная видимая звездная величина Луны в полнолуние -12,9. Звездные величины для планет приведены в таблице 3, Плутон имеет звездную величину +14,7.

Историческая справка 2. Данная система основана на идеях Гиппарха. Во II веке до н.э. он разделил все известные тогда звезды на 6 величин. 20 самых ярких звезд он отнес к 1 величине.

Уточнение 4. Речь идет об оптическом диапазоне, который был доступен с древности. Последние два века, с развитием фотометрии, стали постепенно доступны и другие диапазоны (радиодиапазон, инфракрасный, ультрафиолетовый, рентгеновский и гамма). В астрономических базах данных обычно указывают сразу несколько звездных величин. Тусклые в оптическом диапазоне астрономические объекты, могут быть яркими в других диапазонах.

2 Солнечная система: планеты земной группы и планеты гиганты. Малые тела Солнечной системы.

Солнечная система состоит из Солнца, 8 планет, планет-карликов, спутников планет, астероидов, комет и еще нескольких типов объектов. Объекты, которые не являются планетами, спутниками планет и планетами-карликами называются «**малыми телами солнечной системы**».

Уточнение 5. К «малым телами солнечной системы» относятся кометы, астероиды, метеориты, метеороиды (объекты меньше астероида) и другие. Среди астероидов выделяют несколько классов, например, кентавры (они движутся между планетами-гигантами), троянцы (движутся по орбитам планет синхронно с ними), двойные астероиды и т.д. В 2006 года Международным астрономическим союзом было принято деление планет на классические (большие) планеты и карликовые планеты. В книгах, изданных до 2006 года и даже чуть позже, объекты могут иметь другие названия. Кроме того система постоянно усложняется, так как изучаются новые объекты, особенно тела за орбитой Нептуна — транснептуновые объекты.

Солнце — ближайшая к Земле звезда. Солнце является основным источником энергии для Земли — в одну секунду Земля поглощает $1,2 \cdot 10^{17}$ Дж излучения от Солнца. Масса Солнца составляет 99,866% массы всей Солнечной системы. Солнце удерживает своим тяготением планеты и прочие тела. Различные характеристики планет солнечной системы собраны в таблицах 1–5.

Таблица 1. Физические характеристики планет и Солнца

Название планеты	Средний радиус, км	Средний радиус, в земных радиусах	Период вращения вокруг своей оси	Масса, в земных массах	Средняя плотность, г/см ³ , ρ
Меркурий	2 440	0,383	58,65 суток	0,055	5,43
Венера	6 052	0,95	243,02 суток	0,815	5,24
Земля	6 371	1	23,9345 час	1	5,513
Марс	3 390	0,533	24 час 37 мин	0,107	3,93
Юпитер	69 911	11,0	9 час 55 мин	318	1,33
Сатурн	58 232	9,14	10 час 39 мин	95,2	0,687
Уран	25 362	3,98	17 час 14 мин	14,5	1,27
Нептун	24 622	3,865	16 часов 6 мин	17,15	1,64
Солнце	696 000	109	25,38 суток	330 000	1,4

Уточнение 6. Данные по объектам солнечной системы постоянно уточняются. Здесь и далее приведены величины из книг [4,5] и с сайта НАСА на начало 2020 года.

Проанализируем таблицу 1. Из нее можно увидеть, что по плотности и размерам планеты делятся на две категории. Меркурий, Венера, Земля и Марс имеют относительно большую плотность и относительно небольшой радиус и массу. Эти планеты называют **планетами земной группы**. Большие по массе и радиусу планеты с меньшей плотностью (плотность Сатурна даже меньше, чем плотность воды!) называются **планетами-гигантами**. Планеты земной группы (внутренние планеты) имеют твердую поверхность. Она состоит из горных (скальных) пород. Планеты-гиганты имеют протяженные газовые и ледяные мантии. Их внешнюю оболочку принято называть атмосферой. Она состоит из водорода и гелия у Юпитера и Сатурна, и из водорода, гелия и метана у Урана и Нептуна. Следует отметить, что радиус планет-гигантов определен для слоя, где давление равно одной атмосфере. Ученые стремятся изучить внутреннее строение планет, используя для этого космические аппараты и компьютерное моделирование.

Методическое замечание 2. Запоминать характеристики планет не надо, они будут даны в таблицах. Но для того чтобы ориентироваться в числах, полезно помнить примерные значения величин для Земли.

Обратите внимание на период вращения Земли. Он равен 23,9345 часам, а не 24 часам, как думают многие. Причина в том, что вращаясь вокруг своей оси, планета также перемещается относительно Солнца. Есть звездные сутки — период вращения вокруг своей оси у планеты, отсчитываемый относительно далеких («неподвижных») звезд. Но есть еще и солнечные сутки — промежуток между моментами, когда планета поворачивается к Солнцу одной и той же стороной. Восход Солнца на экваторе планеты происходит через солнечные сутки; из-за неравномерного движения планеты по орбите солнечные сутки меняют длительность в течение года. Средние солнечные сутки на Земле как раз и равны 24 часам. Сильно отличаются от звездных суток средние солнечные сутки на Меркурии (88 дней) и на Венере (116,8 дней).

Меркурий и Венера вращаются заметно медленнее, чем остальные планеты. Поэтому их экваториальный и полярный радиус практически равны. Для остальных планет в таблице 2 приведен полярный и экваториальный радиус. Из Таблицы 2 видно,

что для Земли и Марса разница между этими радиусами около 20 километров, а для Сатурна — почти 6000 км.

Таблица 2. Сравнение экваториального и полярного радиуса планет

Планета	Экваториальный радиус, км	Экваториальный радиус в земных экваториальных радиусах	Полярный радиус, км	Полярный радиус в земных полярных радиусах
Земля	6 378,14	1	6 356,75	1
Марс	3 396	0,532	3 376	0,531
Юпитер	71 492	11,2	66 850	10,5
Сатурн	60 268	9,45	54 364	8,55
Уран	25 569	4,01	24 970	3,97
Нептун	24 770	3,88	24 340	3,83

Историческая справка 3. Когда то планетой считался и Плутон, но с 2006 года астрономами введено новое определение планеты. Один из критериев, согласно которому небесное тело считается планетой – то, что оно должно «расчищать» своим гравитационным полем пространство вокруг своей орбиты. Такому критерию Плутон не удовлетворял.

Методическое замечание 3. Скорее всего, в задачах будут даны именно экваториальные радиусы, но могут быть даны и средние радиусы, поскольку именно они нужны для формулы (3) и в определениях космических скоростей.

Интересные факты 1. Венера периодически сближается с Землей на расстояние 40 миллионов километров. Это минимальное расстояние от Земли до другой планеты, однако, в среднем за *большой промежуток времени* Меркурий является ближайшей к Земле планетой. Дело в том, что когда планета и Земля находятся по разные стороны от Солнца, решающий вклад в расстояние вносит радиус орбиты планеты. А у Меркурия он меньше.

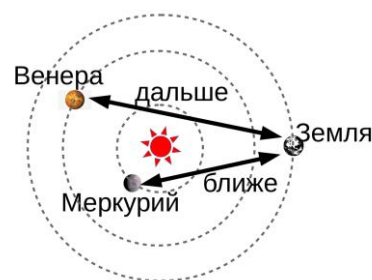


Таблица 3. Данные по орбитальному движению планет и звездным величинам

Название планеты	Среднее расстояние до Солнца, а.е.	Период обращения вокруг Солнца	Эксцентриситет, e	Средняя орбитальная скорость, км/с	Визуальная звездная величина (min : max)
Меркурий	0,387	88 сут	0,206	47	+5,7 : -2,6
Венера	0,72	224,7 сут	0,0068	35	-3,8 : -4,8
Земля	1	1 год = 365,256 сут	0,0167	29,8	
Марс	1,52	687 сут = 1,88 лет	0,093	24,6	+1,6 : -2,94
Юпитер	5,20	11,86 лет	0,048	13	-1,61 : -2,94
Сатурн	9,54	29,46 лет	0,054	9,7	+1,47 : -0,2
Уран	19,19	84,01 лет	0,048	6,8	+5,7 : +5,4
Нептун	30,07	164,8 лет	0,0086	5,4	+8,0 : +7,67

Начнем рассмотрение таблицы 3 со среднего расстояния до Солнца. Планеты земной группы расположены на расстоянии от 0.4 до 1.4 а.е. Планеты-гиганты на

расстоянии от 5 до 30 а.е. Но в Солнечной системе есть и другие объекты: между орбитами Марса и Юпитера находится **главный пояс астероидов** (примерно от 2,2 до 3,2 а.е.). За орбитой Нептуна, на расстоянии до 40 до 100 а.е., расположен **пояс Койпера**, где находятся все карликовые планеты (кроме Цереры) и много миллионов кометных ядер.

Как же было сказано ранее, эксцентриситет (смотри формулу 14) показывает степень отличия эллипса от окружности. Видно, что наиболее вытянута орбита у Меркурия, а Венера вращается по орбите наиболее близкой к круговой. Точка орбиты небесного тела, наиболее далекая от Солнца, называется **афелием**, а наиболее близкая — **перигелием**. Расстояния от Земли до Солнца 147 млн. км в перигелии и 152 млн. км в афелии (эти значения можно получить, основываясь на формуле 14).

Из таблицы также видно, что орбитальная скорость уменьшается, а период обращения увеличивается по мере удаления планет от Солнца. Это правило следует из формул (15) и (17) и выполняется для любых объектов. Поэтому, к примеру, период обращения вокруг Солнца объектов из главного пояса астероидов будет больше периода обращения Марса и меньше периода обращения Юпитера.

Видимая звездная величина говорит о яркости планеты на земном небе. Уран будет едва заметен при хорошем зрении, а Нептун вообще нельзя увидеть невооруженным взглядом. Звездная величина планет меняется, так как зависит от расстояния между Землей и планетой.

Методическое замечание 4. Планеты в таблицах принято располагать по мере удаления от Солнца, однако полезно запомнить их последовательность – это может пригодиться.

Интересные факты 2. Есть одно свойство, по которому Земля похожа на планеты-гиганты. У них у всех есть магнитное поле, которое примерно одинаково для Земли, Сатурна, Урана и Нептуна. У Юпитера магнитное поле заметно больше, чем у других планет. Очень слабое поле найдено у Меркурия, Марс и Венера в данный момент не генерируют собственное магнитное поле.

Интересные факты 3. Радиолокация помогла увидеть поверхность Венеры сквозь плотную атмосферу. Вулканы распределены по всей поверхности планеты и в сумме изливают столько же лавы, сколько и земные вулканы. На Венере есть горы высотой до 11 км. Но самая высокая гора Солнечной системы — вулкан Олимп, высотой более 21 км — находится на Марсе. На Марсе также есть гигантская система каньонов (Долина Маринер), массивный кратер Равнина Эллада. Высота гор на Меркурии 2–4 км, а на Луне есть гора высотой 5,5 км.

Интересные факты 4. Учёные прошлого пытались угадать закономерность, которой подчинялись бы средние расстояния от Солнца до каждой планеты. И у них неплохо получилось. Согласно эмпирическому правилу Тициуса-Боде радиусы орбит приближённо удовлетворяют формуле

$$R_i = \frac{D_i + 4}{10} \text{ а. е.}$$

Здесь введена последовательность $D_i = 0, 3, 6, 12, \dots$ – начиная со второго члена последующий получается умножением на два. Полученное число R_i – радиус орбиты i -й планеты в астрономических единицах. При $D_i = 24$ планеты нет, но примерно на расстоянии 2,8 а.е. находится главный пояс астероидов. Восьмой планетой согласно правилу Тициуса-Боде был бы Плутон, а не Нептун. Современные учёные подобные формулы не используют.

Историческая справка 3. В древности были известны лишь 5 планет. Планеты получили свое название от греческого «блуждающие» (звезды), так как быстро двигались по небосводу, в отличие от звезд – долгое время люди думали, что звезды вращаются все вместе, словно закреплённые на небесной сфере. Луна и Солнце двигались еще быстрее, но планеты «блуждали»,

временами двигаясь в обратном направлении. Землю стали считать такой же планетой, как и остальные, только во время научной революции, которая началась с книги Коперника 1543 года. Еще две планеты, Уран и Нептун, смогли обнаружить после изобретения телескопа — это понятно, если посмотреть на их звездные величины. В 1781 году английский астроном Уильям Гершель открыл Уран, а вот Нептун сначала открыли «на кончике пера» по возмущению орбиты Урана. В 1846 Иоганн Галле, основываясь на расчетах Урбена Леверье, обнаружил новую планету, названную Нептуном. Это открытие стало окончательным доказательством теории гравитации Ньютона.

Таблица 4. Ускорения, космические скорости и наклон экватора к орбите для планет и Солнца

Название планеты	Ускорение силы тяжести на экваторе g , м/с^2	Ускорение свободного падения на экваторе g_f , м/с^2	Первая космическая скорость v_1 , км/с	Вторая космическая скорость v_2 , км/с	Наклон экватора к орбите
Меркурий	3,70	3,70	3,0	4,25	2'
Венера	8,87	8,87	7,35	10,36	-2,7° (177,3°)
Земля	9,798	9,780	7,9	11,186	23°26'
Марс	3,71	3,69	3,6	5,03	25,2°
Юпитер	24,79	23,12	42,6	60,2	3,1°
Сатурн	10,44	8,96	25,5	36,1	26,7°
Уран	8,87	8,7	15,1	21,4	97,8°
Нептун	11,15	11,0	16,7	23,6	28,3°
Солнце	274			617,7	

Уточнение 7. Не только звездная величина определяет, можно ли наблюдать объект. Так Меркурий сложно заметить, потому что он находится рядом с Солнцем. Орбиту определяет не только эксцентриситет и среднее расстояние до Солнца, но и расположение орбиты в пространстве. Солнечная система трехмерна, об этом не стоит забывать.

Рассмотрим таблицу 4. Начнем с наклона плоскости экватора к плоскости орбиты. При значительном наклоне экватора к орбите на планете есть времена года. Можно заметить, что у Земли, Марса, Сатурна и Нептуна угол наклона экватора примерно одинаковый (от 23° до 28°). Это означает, что на этих планетах есть смена сезонов — примерно такая же, как на Земле. Вот только продолжительность сезона зависит от периода вращения вокруг Солнца, и у Нептуна, например, один сезон длится больше 40 лет. У Меркурия, Венеры и Юпитера наклон экватора к орбите практически отсутствует, это значит, что там нет сезонов, сутки одинаковы на всех широтах, как на Земле в день осеннего или весеннего равноденствия. Уникален Уран: он вращается «лежа на боку»: наклон его экватора к орбите близок к 90°. Большую часть времени почти на половине Урана стоит полярная ночь, а на второй половине — полярный день. Примерно через 40 лет (половине года на Уране) после небольшого периода равноденствия, ночь и день меняются местами. Значение угла наклона также показывает, как вращается планета вокруг своей оси. Большинство планет, как и Земля, вращаются против часовой стрелки (если смотреть на ее северный полюс, «сверху» на рис. 3). Но если угол от 90° до 180° (иногда этот угол записывают как отрицательный), то это означает, что такие планеты

(Венера и Уран) вращаются вокруг своей оси в другую сторону, то есть по часовой стрелке. Направление вращения вокруг Солнца у всех планет совпадает (против часовой стрелки).

Сравнивая на экваторе ускорение притяжения и ускорение свободного падения можно заметить, что эти величины равны для Меркурия и Венеры, почти равны для Земли и Марса, и заметно отличаются для планет-гигантов. Согласно формуле (22), такое отличие связано с быстрым вращением и большим радиусом планет. Интересно, что, несмотря на большие размеры планет-гигантов, ускорение притяжения на них (кроме Юпитера) почти такое же, как на Земле. Это следует из формулы (4), так как g определяется произведением плотности на радиус планеты. А плотность у планет-гигантов в несколько раз меньше земной плотности. В таблице 4 приведена и первая и вторая космическая скорость, но так как они всегда связаны простым соотношением (13), это избыточные данные. Обычно приводят только одну космическую скорость, чаще вторую. Космические скорости можно найти по формулам (9) и (12), взяв данные из таблиц (g из таблицы 4 и R из таблиц 1 или 2).

Подставив значение радиуса планеты в формулу (18) можно также найти линейную скорость вращения на экваторе. Так, для Земли это 465,11 м/с, а для Юпитера — 12,6 км/с.

Таблица 5. Дополнительные сведения о планетах.

Название планеты	Количество спутников	Температура поверхности, К	Средняя температура поверхности, К	Атмосферное давление, атм
Меркурий	0	от 88 до 750	440	$<10^{-10}$
Венера	0		737	92
Земля	1	От 185 до 331	288	1,0
Марс	2	от 120 до 308	210	0,006
Юпитер	79		165	
Сатурн	82		134	
Уран	27	От 47 К *	76	
Нептун	14	52–61 *	72	

Примечание: * Приводится температура в тропопause, одном из нижних слоев атмосферы.

Для решения задач в таблице 5 наиболее важно количество спутников. Из планет земной группы только у Марса есть 2 спутника, и у Земли 1 (разумеется, искусственные спутники не в счет). У планет-гигантов их известны десятки. Среди открытых спутников есть объекты размером с Меркурий и объекты радиусом в несколько километров. Кроме того, у всех планет-гигантов есть кольца, состоящие из огромного числа очень маленьких объектов — камней, льдинок и частиц пыли. Наиболее заметны кольца у Сатурна. Они имеют протяженность 250 тысяч километров в ширину, но их толщина менее 1 км. У других планет-гигантов кольца еще более разреженные. Атмосферное давление приведено только для планет земной группы, поскольку у них ясно, что такое поверхность планеты. Из таблицы следует, что самой «горячей» планетой является Венера, хотя она дальше от Солнца, чем Меркурий. Также можно сравнить температуру Земли с температурой Луны (от 120 К в среднем ночью до 280 К в среднем днем). Отсюда можно сделать вывод, насколько важна атмосфера в тепловом балансе планеты (так широко известный «парниковый эффект» ярко проявляется на Венере). У планет и других тел Солнечной

системы могут быть резкие различия между температурой различных частей планет, что видно из таблицы 5.

Методическое замечание 5. Количество спутников у планет гигантов помнить не надо (выше оно дано на начало 2020), тем более что оно постоянно растет в процессе изучения космического пространства. Однако полезно помнить, сколько спутников у планет земной группы.

Интересные факты 5. На Юпитере есть Большое Красное пятно – гигантский ураган, который наблюдают уже 350 лет. Его размер 20 тысяч км на 12 тысяч км, скорость ветра достигает 500 км/час. Однако, это далеко не рекорд: на Нептуне скорость ураганов достигает 2100 км/час.

Интересные факты 6. Уран кажется голубоватым, а Нептун зеленоватым.

Малые объекты Солнечной системы сосредоточены в основном в главном поясе астероидов, поясе Койпера и облаке Оорта (последней относится к области гипотез и, предположительно, начинается на расстоянии 2000–5000 а.е.). На данный момент известно пять планет-карликов (карликовых планет). Они обращаются вокруг Солнца, достаточно большие по массе, чтобы иметь форму близкую к сферической, но недостаточно большие, чтобы доминировать на своей орбите.

Таблица 6. Физические свойства планет-карликов.

Название	Экваториальный радиус, км	Период вращения вокруг оси	Масса, в земных массах	Средняя плотность, г/см ³	Ускорение притяжения на экваторе, м/с ²
Плутон	1151	6,38 сут	0,22%	1,89	0,62
Хаумея	620	3,9 час	0,07%	2,6	
Макемаке	715	22,5 час	0,05%	≈2	
Эрида	1163	25,9 час	0,28%	≈2,5	
Церера	476,2	9,1 час	0,016%	2,09	0,28

Таблица 7. Данные по орбитальному движению планет-карликов.

Название	Год открытия	Среднее расстояние до Солнца, а.е.	Период обращения вокруг Солнца, лет	Эксцентриситет Орбиты	Количество спутников
Плутон	1930	39,48	247,9	0,249	5
Хаумея	2003	43	284,8	0,20	2
Макемаке	2005	45,8	305,3	0,16	0 или 1
Эрида	2003	68	557	0,43	1
Церера	1801	2,77	4,60	0,08	0

В таблицах 6 и 7 приведено меньше данных, чем в таблицах 1–5. Отчасти это потому, что малые планеты менее изучены. Так угол наклона экватора к орбите достаточно точно установлен только у Плутона (122,5°). Планеты-карлики заметно меньше обычных планет. Сравнение с таблицей 1–4 показывает, что радиус самой большой из планет-карликов, Эриды, равен 0,48 радиусов Меркурия, а масса на порядок меньше массы Меркурия. Плотность планет-карликов меньше, чем планет земной группы,

но больше, чем у планет-гигантов. Из таблицы 6 видно, что Хаумея быстро вращается. И, действительно, она является одним из самых быстро вращающихся объектов в Солнечной системе (есть астероиды, которые делают один оборот менее чем за минуту, но их радиус около 10 м). На фотографиях Хаумеи хорошо видно, что хотя она имеет правильную форму, поверхность её не шар, а эллипсоид: на её форму повлияло быстрое вращение.

Из данных таблицы 7 мы можем в очередной раз убедиться, что чем дальше планета от Солнца, тем медленнее она вращается вокруг него. По наиболее вытянутой орбите вращается Эрида. Она же является самой крупной из известных карликовых планет и находится дальше всего от Солнца.

Уточнение 9. Количество планет-карликов, скорее всего, будет расти. Сейчас известно, по крайней мере, 10 небесных «кандидатов» на эту роль.

Историческая справка 5. Из таблицы 7 видно, что три планеты-карлика – недавнее открытие, а Церера и Плутон известны достаточно давно. С момента открытия до 2006 года Плутон считался планетой. Однако, когда учёные обнаружили, что существует достаточно много подобных объектов со сходными орбитами, химическим составом, то возник вопрос, что делать: добавлять еще несколько планет или исключить Плутон из списка планет, создав для подобных тел отдельный класс «малые планеты». Так как это был вопрос классификации, решали его голосованием на сессии Международного астрономического союза. История другой малой планеты, Цереры, еще более бурная: изначально не был известен ее размер, и первые несколько лет она считалась полноправной планетой, а потом до 2006 года была астероидом.

Перейдем теперь к спутникам. Большинство спутников планет-гигантов — небольшие тела размером от десятков до сотен километров. В 2000-ые стали открывать спутники радиусом около километра. В таблице 8 и 9 приведены данные для всех спутников Марса и Земли и самых крупных из спутников каждой планеты-гиганта и Плутона.

Таблица 8. Данные по орбитальному движению спутников планет и спутника Плутона.

Название спутника	Чей спутник	Среднее расстояние до планеты в тысячах км.	Период обращения вокруг планеты, суток	Эксцентриситет Орбиты	Год открытия
Луна	Земли	384,40	27,32	0,055	
Фобос	Марса	9,4	0,32	0,015	1877
Деймос	Марса	23,5	1,26	0,0003	1877
Ио	Юпитера	422	1,77	0,004	1610
Европа	Юпитера	671	3,55	0,009	1610
Ганимед	Юпитера	1070	7,15	0,001	1610
Каллисто	Юпитера	1883	16,7	0,007	1610
Титан	Сатурна	1222	15,9	0,029	1655
Титания	Урана	436	8,7	0,0011	1787
Оберон	Урана	583	13,5	0,0014	1787
Тритон	Нептуна	355	5,9	0,000016	1846
Харон	Плутона	17,5	6,39	0,0022	1978

Рассмотрим таблицы 8 и 9. Из последней колонки таблицы 9 можно увидеть, что отношение массы Плутона и Харона 8:1, что больше, чем у какой-либо другой пары спутник-планета. Хотя все пары спутник-планета (или планета-Солнце) вращаются вокруг общего центра масс, но для большинства систем можно с большой точностью считать, что спутник вращается вокруг планеты. Однако для пары Плутон–Харон такое приближение будет уже неверным. Плутон и Харон фактически являются двойной планетой. На втором месте – пара Земля-Луна, остальные спутники более чем в 3000 раз уступают по массе «своей» планете.

При сравнении таблиц 1 и 9 видно, что радиус Ганимеда и Титана больше радиуса Меркурия, однако Меркурий более массивный (его масса $3300 \cdot 10^{20}$ кг). Фобос и Деймос не имеют шарообразной формы, впрочем, как и другие объекты, радиусом не более нескольких сот километров. Можно убедиться, что для разных спутников одной планеты выполняются законы Кеплера. Отметим, что период вращения спутников вокруг своей оси не приведен, но это не из-за недостатка информации, а потому, что многие крупные спутники (в том числе Луна) синхронизируют своё вращение с вращением планеты: их период обращения вокруг планеты равен их периоду обращения вокруг своей оси.

Таблица 9. Физические свойства спутников планет и Харона.

Название спутника	Экваториальный радиус или размер, км	Ускорение силы притяжения (на экваторе), м/с ²	Масса, 10^{20} кг	Средняя плотность, г/см ³	Отношение массы планеты к массе спутника
Луна	1737,5	1,62	734,9	3,34	81,3
Фобос	13×11×9	0,01	0,000106	1,9	$6 \cdot 10^7$
Деймос	8×6×5		0,000015	1,5	$3 \cdot 10^8$
Ио	1822	1,80	893	3,5	$21 \cdot 10^3$
Ганимед	2631	1,43	1 482	1,9	$13 \cdot 10^3$
Европа	1561	1,32	4 80	3,0	$40 \cdot 10^3$
Каллисто	2410	1,24	1 076	1,8	$17 \cdot 10^3$
Титан	2575	1,35	1 346	1,9	$4 \cdot 10^3$
Титания	789	0,37	34	1,7	$26 \cdot 10^3$
Оберон	761	0,33	29	1,6	$30 \cdot 10^3$
Тритон	1353	0,78	214	2,1	$5 \cdot 10^3$
Харон	604	0,28	15	1,7	8

Уточнение 10. Для таблиц 8 и 9 выбраны спутники, открытые первыми. Они же, что неудивительно, являются самыми крупными спутниками конкретной планеты. В большинстве случаев другие спутники планет, если они есть, намного меньше, чем приведенные в таблице. Исключением является Уран, поскольку радиус его спутников Ариэль (579 км) и Умбриэль (585 км) лишь немного меньше радиусов Титании и Оберона.

Интересные факты 7. Крупные спутники имеют свои уникальные особенности. Так, Ио — самое вулканически активное место в Солнечной системе. На ней лава и газы извергаются в космический вакуум со скоростью 1 км/с. В условиях низкой гравитации это приводит к появлению своего рода «хвостов» длиной 200-400 км. Многие учёные убеждены, что на Европе

есть океан с соленой водой в жидком состоянии, причём воды там должно быть в два раза больше, чем на Земле. Возможно, океаны есть и на Каллисто, Титане и Ганимеде. Массивный Ганимед единственный из спутников имеет магнитное поле. На поверхности Каллисто больше кратеров, чем где-то еще, имеются и другие детали рельефа, например т. н. «факулы». Титан единственный из спутников имеет существенную атмосферу (в основном азотную) давлением 1,5 земной атмосферы. На Титане, единственном, кроме Земли, есть на поверхности реки и моря (но, разумеется, не из воды, а из метана и этана). Тритон единственный из крупных спутников вращается против направления вращения своей планеты. Тритон содержит 99,5% массы всех спутников Нептуна.

Историческая справка 6. Так как невооруженным глазом из всех спутников планет Солнечной системы мы видим только Луну, понадобилась помощь оптики, чтобы появилась такая категория небесных тел, как спутники планет. В 1610 году Галилей, с помощью только, что созданного телескопа, открыл четыре спутника Юпитера (их так и называют галилеевыми). В телескоп Галилеей и другие ученые увидели на Луне горы и впадины, до этого известные только на Земле. Это помогло принять идею гелиоцентризма, ибо теперь Землю стало возможно воспринимать такой же планетой, как и другие.

Известно более 900 тысяч **астероидов** и более 3 500 **комет**. Астероиды — твердые каменные тела, вращающиеся вокруг Солнца по орбитам близким к круговым. Но их размеры меньше размеров планет: они имеют диаметр от 10 метров до 530 километров. У 150 астероидов есть свои спутники, некоторые даже имеют 2 спутника. По составу астероиды делятся на каменные, железные и железокаменные.

Кометы движутся по сильно вытянутым орбитам (так эксцентриситет кометы Галлея 0,967) и резко меняют свой вид при приближении к Солнцу. Кометы (их ядра) состоят из льда, камней и пыли. Согласно второму закону Кеплера кометы проводят большую часть времени далеко от Солнца. При приближении кометы к Солнцу вещество кометы испаряется из-за потока частиц и света от Солнца. У кометы появляется голова (кома) и хвост из пыли и газа. **Хвост** всегда направлен **от Солнца** и простирается на миллионы километров.

В таблице 10 приведены некоторые физические величины для 13 астероидов. 11 из них — самые крупные астероиды из главного пояса астероидов. Для сравнения приведены данные для близкого к Солнцу Икара и Харикло. Харикло — единственный известный астероид, который имеет кольцо, как и планеты-гиганты. Плотность удалось определить только у некоторых астероидов (в основном, двойных), и, для разных астероидов и разных оценок, она составляет $1\text{--}7\text{ г/см}^3$, хотя есть и более легкие астероиды изо льда.

Уточнение 11. В таблице 10 приведены диаметры объектов, но астероиды редко имеют правильную форму. Астероиды недостаточно массивны, чтобы гравитация выровняла их, придав сферическую форму. Даже Паллада имеет размеры $582\times556\times500\text{ км}$, а Веста $573\times557\times446\text{ км}$. Деление на астероиды и кометы достаточно условно, так как есть промежуточные объекты.

Интересные факты 8. На Весте есть кратер в 500 км (95% её диаметра).

Таблица 10. Параметры некоторых астероидов

Название астероида	Средний диаметр, км	Среднее расстояние до Солнца (а.е.)	Эксцентриситет	Период вращения вокруг своей оси, час	Период обращения вокруг Солнца, лет	Год и номер открытия
Икар	1	1,08	0,82	2,3	1,12	1949, 1566
Веста	525	2,36	0,089	5,3	3,63	1807, 4
Эвномия	232	2,64	0,19	6,1	4,30	1851, 15
Юнона	247	2,67	0,26	7,2	4,36	1804, 3
Паллада	545	2,77	0,23	7,8	4,62	1802, 2
Геркулина	168	2,78	0,28	9,4	4,62	1904, 532
Психея	226	2,92	0,13	4,2	5,00	1849, 16
Интерамния	306	3,06	0,15	8,8	5,34	1910, 704
Европа	304	3,09	0,11	5,6	5,44	1958, 52
Гигея	407	3,14	0,11	27,6	5,57	1849, 10
Евфросина	267	3,155	0,22	5,5	5,61	1854, 31
Давида	270	3,165	0,19	5,6	5,63	1903, 511
Харикло	302	13,1	0,17	7,0	63	1997, 10199

3 Звезды: разнообразие звездных характеристик и их закономерности. Источники энергии звезд.

Начнем рассказ о звездах с созвездий. Созвездие — это участок неба. Все небо поделено прямыми ломаными линиями на 88 созвездий. Их границы и названия были установлены в 1922–1935 годах международным астрономическим союзом. С тех пор латинские имена созвездий не менялись (а вот с переводом на русский возможны варианты, например, Centaurus переводится и как Центавр, и как Кентавр). Важно понимать, что созвездие означает лишь диапазон направлений с точки зрения земного наблюдателя. Звезды одного созвездия расположены от нас на самых разных расстояниях (так яркие звезды в созвездии Орион находятся от нас на расстоянии и в 28 и в 3000 световых лет). Даже в фантастическом романе (если он грамотно написан) космический объект может с Земли лететь в направлении какого-то созвездия, но не может лететь «в созвездие». Яркие звезды в каждом созвездии носят названия букв греческого алфавита, начиная с альфы. Некоторые звезды, в основном яркие, исторически имеют также свои собственные имена (Альдебаран, Вега, Сириус, Арктур, летящая звезда Барнарда и другие).

Историческая справка 7. Ранее созвездиями считали совокупность некоторого количества ярких звезд (сейчас их называют астеризмами). Международный астрономический союз основывался на созвездиях европейской традиции. Созвездия северного полушария известны с древности. Их название часто связаны с мифами (Кассиопея, Волопас, Дева...). Созвездия Южного полушария получили свои названия после того, как началась эпоха Великих географических открытий. Они часто названы в честь объектов, на которых они похожи (Журавль, Индеец, Южный треугольник, Лисичка, Секстант...).

Звезды являются раскаленными газовыми шарами. Источником энергии звезд является **термоядерный синтез**. В астрофизике принято говорить о горении (водорода, гелия, углерода...), но надо четко понимать, что это не химическая, а ядерная реакция, в которой образуются новые элементы. Ядерные реакции синтеза требуют больших температур и давлений. Хотя температура поверхности Солнца около 6000 К, в его центре температура достигает почти 16 миллионов К, а плотность достигает 158 г/см³. Именно там проходят ядерные реакции. Солнце на 73,46% состоит из водорода, и на 24,85 % из гелия.

Уточнение 12. Правильнее говорить, что обычные звезды состоят из плазмы. Это четвертое состояние вещества, соответствующее очень высоким температурам. Плазма состоит не из нейтральных атомов, а из ионов и свободных электронов. Вещество нейтронных звезд и белых карликов, о которых речь пойдет дальше, имеют свои особенности по сравнению с веществом обычных звезд.

Почти все, что мы знаем о звездах, мы знаем из анализа их излучения. Земной наблюдатель может различить блеск звезды, ее цвет, получить спектр. По спектрам звезды разделены на спектральные классы. Основные классы звезд: О, В, А, F, G, K, М. Типичные спектры звезд этих классов показаны на рис. 4. Линии в спектрах свидетельствуют о разном составе звездных атмосфер (внешних слоев звезд).

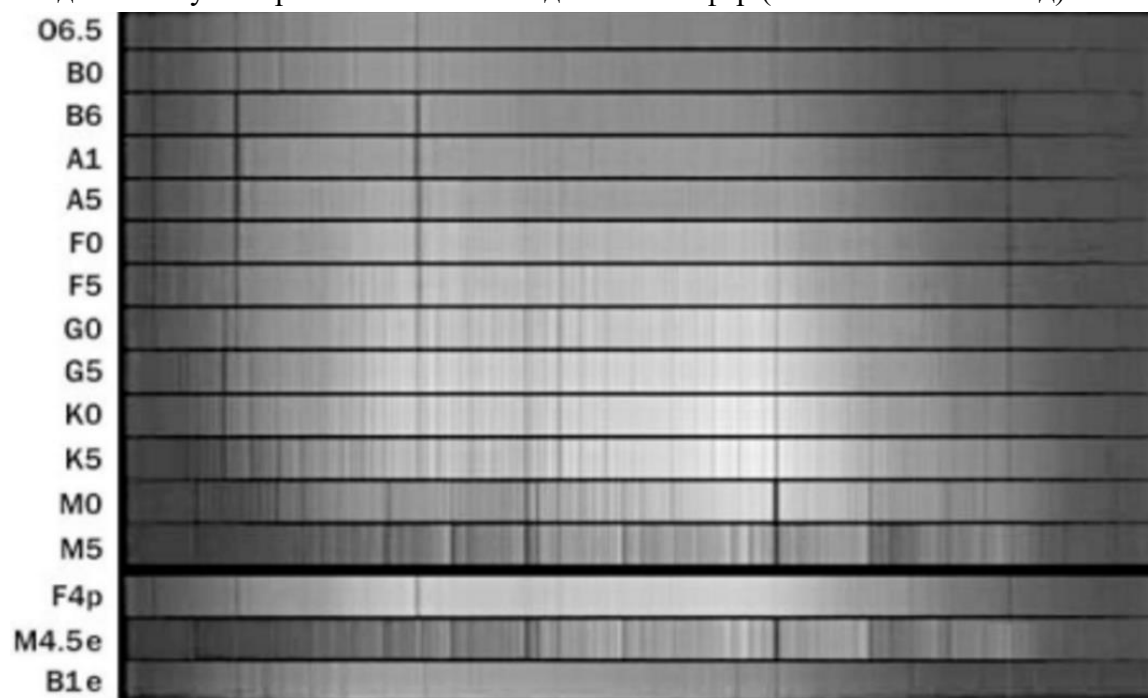


Рис. 4. Типичные спектры звезд разных классов.

Методическое замечание 6. Для запоминания последовательности классов звезд используйте фразу на английском **Oh, Be A Fine Girl, Kiss Me**. Обязательно надо помнить, что Солнце имеет спектральный класс G.

Уточнение 13. Более точно делить каждый класс на 10 подклассов (кроме О и М, где подклассов меньше). После А будет идти F0, а за F9 — G. Бывают и дробные спектральные классы.

Историческая справка 8. Приведенное выше деление звезд на классы называется Гарвардской классификацией звезд. Она была разработана Эдуардом Пикерингом и Вильяминой

Флеминг в конце XIX века. Позже Гарвардская классификация была дополнена, как новыми классами, так и делением на размеры звезд (от сверхгигантов до карликов).

По спектрам можно определить температуру поверхности звезды, которая может быть от 2000 до 100 000 К. В таблице 11 видна связь между температурой звезды, ее цветом и ее спектральным классом. Спектральный класс почти полностью определяется температурой звезд. Однако температура — вторичный критерий по этой классификации, поэтому температурные границы классов не очень четкие и несколько отличаются у разных авторов.

Таблица 11. Связь между спектром и температурой [6].

Спектральный класс	Температура, К	Цвет	Представители
O	35 000–80 000	Голубоватый	ξ Кормы, λ Ориона, ξ Персея
B	12 000–30 000	Голубовато-белый	Ригель, Хадар, Акрукс
A	8 000–11 000	Белый	Сириус А, Вега, Альтаир
F	6 500–7 500	Желтоватый	Канопус, Процион
G	5 000–6 000	Желтый	Солнце, Капелла (А и В), α Кентавра А
K	4 000–5 000	Красноватый	Арктур, ε Эридана
M	2 000–3 500	Красный	Бетельгейзе, Проксима Кентавра, летящая звезда Барнарда

Звездная величина позволяет сравнивать звезды по создаваемой ими освещенности. Но блеск звезды зависит от расстояния до звезды. Поэтому, зная расстояние до звезды, рассчитывают **абсолютную звездную величину**. Это видимая звездная величина, которую имела бы звезда, если бы находилась от нас на расстоянии 10 парсек. По этой величине можно рассчитать светимость (мощность излучения объекта) в единицах Солнца. Данные по некоторым звездам приведены в таблицах 12 и 13. Наглядно видно, что блеск звезды зависит и от расстояния до звезды, и от ее светимости. Сириус, чья светимость не очень большая, находится от нас на расстоянии всего лишь 2,6 парсека, поэтому является самой яркой звездой на земном небе (кроме, разумеется, Солнца), а ближайшая к нам звезда (Проксима Кентавра) светит в 500 000 раз слабее Солнце и поэтому видна даже не в каждый телескоп. Денеб же светит настолько сильно, что имеет значительную звездную величину 1,25, находясь от нас на расстоянии более 400 парсек.

Таблица 12. Самые яркие звезды на земном небосклоне

Звезда	Другое название	Блеск, звездные величины	Спектральный класс	Абсолютная звездная величина	Расстояние, пк	Светимость в единицах светимости Солнца
Солнце		-26,74	G2	4,8		1
Сириус	α Большого Пса	-1,46	A	1,4	2,6	22
Канопус	α Киля	-0,74	F	-5,6	95	14 000
Арктур	α Волопаса	-0,05	K	-0,3	11,3	110
Ригель Кентаврус/ Толиман	α Кентавра	0,01	G+K	4,4	1,3	1,5
Вега	α Лиры	0,03	A	0,6	7,7	50
Капелла	α Возничего	0,08	G+G	-0,5	13	130
Ригель	β Ориона	0,13	B	-7,0	260	50 000
Процион	α Малого Пса	0,37	F	2,6	3,5	7
Бетельгейзе	α Ориона	0,42	M	-5,5	150	13 000
Ахернар	α Эридана	0,46	B	-2,7	43	1 000
Хадар	β Кентавра	0,60	B	-4,8	120	7 000
Акрукс	α Южного Креста	1,33	B	-3,6	100	2 300
Альтаир	α Орла	0,76	A	2,2	5,1	10
Альдебаран	α Тельца	0,86	K	-0,7	20	150
Антарес	α Скорпиона	0,91	M+B	-5,2	170	10 000
Спика	α Девы	0,97	B+B	-3,5	77	2 000
Поллукс	β Близнецов	1,14	K	1,1	10,4	30
Фомальгаут	α Южной Рыбы	1,16	A+K+M	1,7	7,7	17
Мимоза	β Южного Креста	1,25	B	-3,4	85	1 900
Денеб	α Лебедя	1,25	A	-6,9	430	50 000

Уточнение 14. Здесь и далее приведены данные из [6], и с базы данных SIMBAD. Многие звезды переменные (в таблице 12 их 9). К примеру, звездная величина Бетельгейзе меняется от 0,1 до 0,9, так как меняется ее светимость.

В таблице 12 в столбце «спектральный класс» у некоторых звезд указано 2 класса, а для Фомальгаута даже 3 класса. Это означает, что такая звезда является **двойной или тройной**: две или три звезды находятся близко и составляют звездную систему. Если, как в таблице 13, такие звезды рассматриваются отдельно, то к названию звезды добавляют буквы А, В и С. Например, Сириус А и Сириус В. Отметим, что звезды в таблице 12 имеют свои исторические названия, и все они являются самими яркими или вторыми по яркости звездами в их созвездии. Большинство же звезд из таблицы 13 имеют сложные названия из каталогов.

Таблица 13. Ближайшие к Солнцу звезды.

Звезда	Звездные величины	Спектральный класс	Абсолютная звездная величина	Расстояние в пк	Светимость в единицах светимости Солнца
Проксима Кентавра	11,1	M	15,6	1,3	$5 \cdot 10^{-5}$
α Кентавра А	0	G	4,3	1,35	1,6
α Кентавра В	1,3	K	5,7	1,35	0,43
Летящая звезда Барнарда	9,5	M	13,2	1,8	0,00042
Вольф 359	13,5	M	16,6	2,4	$2 \cdot 10^{-5}$
Лаланд 21185	7,5	M	10,5	2,5	0,005
Сириус А	-1,5	A	1,4	2,6	22
Сириус В	8,44	белый карлик	11,3	2,6	0,0024
Лейтен 726-8 А	12,7	M	15,5	2,7	$5 \cdot 10^{-5}$
Лейтен 726-8 В	13,2	M	16,1	2,69	$3 \cdot 10^{-5}$
Росс 154	10,5	M	13,1	3	0,0005
Росс 248	12,3	M	14,8	3,2	0,00011
ϵ Эридана	3,7	K	6,2	3,2	0,27
Лакайль 9352	7,3	M	9,8	3,3	0,010
Росс 128	11,2	M	13,9	3,4	0,00023

Можно заметить, что в таблицах 12–13 нет ни одной звезды класса О, но много звезд класса М. И это действительно отражает распределение звезд в Галактике: от О к М количество звезд каждого класса увеличивается. Но к классу М относится и яркая Бетельгейзе и очень тусклая Проксима Кентавра. Связь между светимостью и классом есть, и она отражена в диаграмме Герцшпрунга—Рассела (рис. 5). На ней по горизонтали отложены спектральные классы (а значит и температура поверхности), а по вертикали — абсолютные звездные величины (а значит светимость звезд).

На диаграмме видно, что большая часть звезд находится в широкой полосе от верхнего левого края (высокая светимость и высокая температура) до нижнего правого края (низкая светимость и низкая температура). Эта полоса называется **главной последовательностью звезд**. На диаграмме существует еще несколько областей существования звезд — область гигантов, сверхгигантов и белых карликов. Наличие ее объясняется тем, что светимость L , температура поверхности T и радиус R связаны. Довольно точно выполняется формула

$$L \sim R^2 \cdot T^4 (27)$$

Уточнение 15. Обычно пишут «Рассел», но иногда встречается и написание «Рессел». Разумеется, это одна и та же фамилия Russel.

Историческая справка 9. Диаграмма долго носила имя Рассела (американского астронома Генри Норриса Рассела), впервые предложившего её в 1913, однако затем выяснилось, что

датский астроном Эйнар Герцшпрунг опубликовал подобную диаграмму в 1911 году в малоизвестном «Журнале научной фотографии».

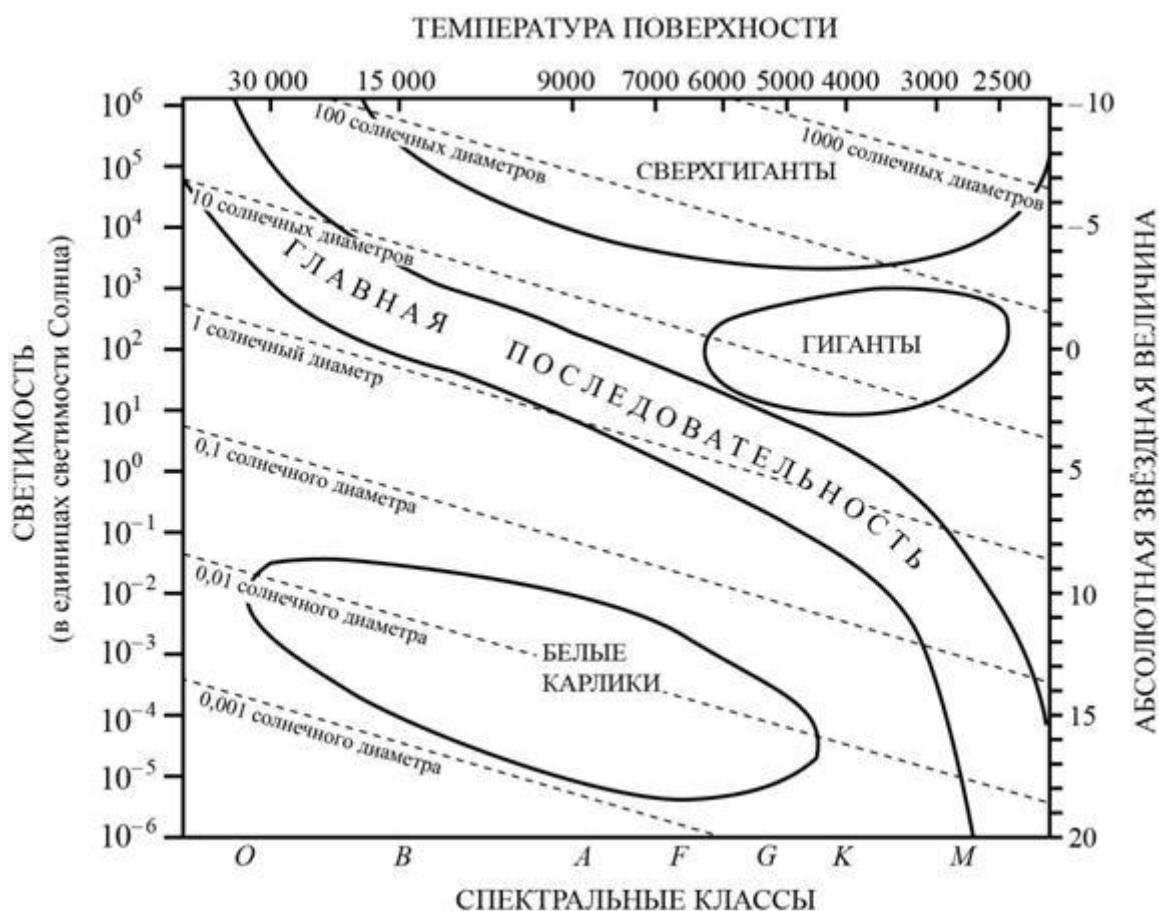


Рис. 5. Диаграмма Герцшпрунга — Рассела (с сайта ФИПИ).

Таблица 14. Связь спектрального класса и других параметров для типичных звезд главной последовательности.

Спектральный класс	Масса, в массах Солнца	Радиус, в радиусах Солнца	Светимость, в светимостях Солнца	Температура, К	Время жизни, миллиарды лет
O	60	11	500 000	48 000	0,004
B	5	3,7	750	17 000	0,08
A	1,9	1,8	24	8 700	1,2
F	1,35	1,2	4,0	6 400	3,5
Солнце	1	1	1	5 800	10
G	0,95	0,91	0,70	5 600	12
K	0,68	0,74	0,18	4 400	43
M	0,2	0,21	0,005	3 200	800

Уточнение 16. Приведены значения для классов O6, B5, A5, F5, G5, K5 и M4.

Около 90% звезд на диаграмме Герцшпрунга-Рассела находятся на главной последовательности. Связь между их классом (температурой) радиусом, временем жизни, массой и светимостью приведены в таблице 14. Для изучения нам доступно много звезд разных возрастов, поэтому мы можем изучать их эволюцию — под этим термином астрономы имеют в виду изменения во время жизни звезды. Примерно также ведут

исследования учёные, занимающиеся демографией — они изучают детей, молодежь и пожилых в популяции, а не следят за жизнью одного человека. Под временем жизни звезды имеется в виду время её участия в термоядерном синтезе. Из таблицы 12 и 13 было видно, что наше Солнце — довольно средняя звезда по своей светимости, а из таблицы 14 видно, что она и по размерам средняя. Светимость связана с радиусом и температурой звезды (формула 27) — чем больше температура и/или радиус звезды, тем больше ее светимость.

Таблица 15 Сравнение звезд главной последовательности, гигантов, сверхгигантов и белых карликов. Примерные данные

Спектральный класс	Масса, в массах Солнца	Радиус, в радиусах Солнца	Светимость, в светимостях Солнца	Плотность, г/см ³
О, главная последовательность	20–60	8–15	50 000–500 000	0,02–0,05
Солнце	1	1	1	1,4
М, главная последовательность	0,15–0,5	0,2–0,5	0,0004–0,05	2,6–22
Жёлтый гигант		6–9	около 100	0,004–0,01
Красный гигант		25–150	около 150	10^{-4} – 10^{-6}
Желтый сверхгигант		200–400	>1000	10^{-6} – 10^{-7}
Красный сверхгигант		500–1000	>8000	10^{-7} – 10^{-8}
Белый карлик		0,01	0,001	10^6

Из таблицы 15 видно, что самые маленькие звезды — нейтронные звезды и белые карлики. Радиус белых карликов примерно равен земному радиусу, но масса близка к массе Солнца. А нейтронные звезды имеют радиусы в несколько десятков километров при массе сравнимой с солнечной. Плотность нейтронных звезд достигает 10^{14} г/см³. Это огромная плотность, при которой протоны и электроны сливаются, образуя нейтроны.

Методическое замечание 7. Если в задаче надо определить то, чем является звезда, то ориентируйтесь в первую очередь на плотность. Плотность близкая к плотности воды, говорит о том, что это звезда с главной последовательности. Плотность меньше 0,01 г/см³ говорит, что это гигант или сверхгигант. Плотность в миллионы раз большая, чем плотность воды, у белых карликов, а в триллионы раз большая плотность у нейтронных звезд. Дополнительную информацию дает радиус — у гигантов радиус примерно равен десяткам солнечных, а у сверхгигантов сотни солнечных радиусов. Для того чтобы точнее определить звезду, надо учитывать спектральный класс, но скорее всего в задаче будет красный гигант или сверхгигант.

4 Современные представления о происхождении и эволюции звезд

Наше Солнце образовалось из облака газа, сжавшись с 200 000 а.е. до сегодняшнего размера. Стадия формирования звезды заняла 100 миллионов лет. Солнцу 4,65 миллиардов лет, и еще около 5 миллиардов в нем будут проходить реакции синтеза гелия из водорода. Затем, когда «выгорит» весь водород, оно расширится до красного гиганта, а его ядро, наоборот, сожмется. Начнется реакция синтеза углерода («горения» гелия) в ядре. На этой стадии также будет синтезироваться кислород. Стадия будет проходить около миллиарда лет. В конце Солнце станет углеродно-кислородным **белым карликом** и будет медленно остывать. На стадии белого карлика уже не проходят ядерные реакции.

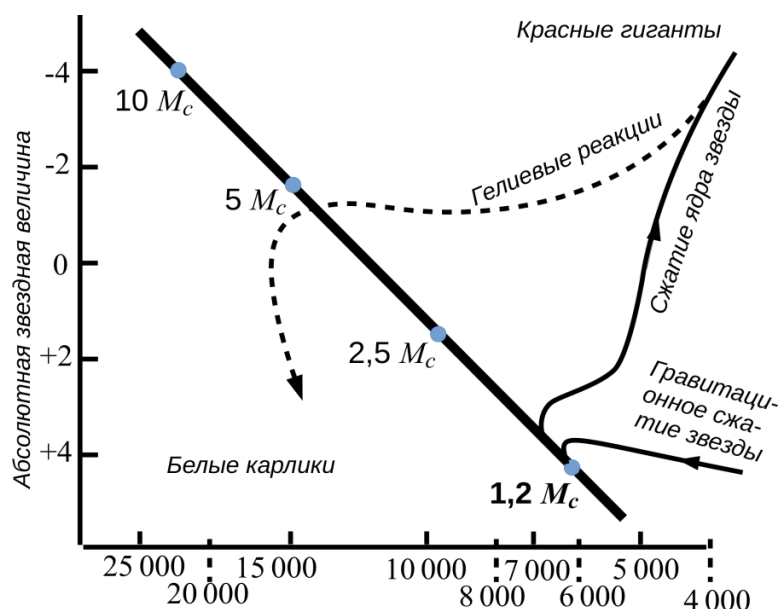


Рис. 6. Показана эволюция звезды массой 1,2 солнечной массы и ее место на диаграмме Герцшпрунга-Рассела. Отмечена главная последовательность. Обратите внимание на неравномерность масштаба по горизонтальной оси. **Уточнение 17.** Рисунок взят из книги А.М. Прохорова «Физика космоса», 1986.

Солнце до превращения в красного гиганта будет увеличивать свою светимость, несколько смещаясь на главной последовательности. Став красным гигантом, уйдет с главной последовательности (рис. 6). Эволюция Солнца во многом типична для звезд с начальной массой от $0,5 M_{\odot}$ (солнечной массы) до $4 M_{\odot}$. Звезды с начальной массой $0,08 M_{\odot}$ до $0,5 M_{\odot}$ участвуют только в синтезе гелия, после чего превратятся в гелиевого белого карлика. Массивные звезды участвуют и в следующих стадиях термоядерного синтеза (количество стадий в среднем растет с увеличением начальной массы звезды). Синтез оказывается энергетически выгоден, пока не синтезируется **железо** и близкие к нему элементы. Как идет эволюция звезды зависит от начальной массы звезды и от других факторов. В конце своей жизни звезда перестает участвовать в термоядерном синтезе, став белым карликом, нейтронной звездой или черной дырой.

Большинство звезд находятся на главной последовательности. Это потому, что около 90% жизни в звездах идет реакция синтеза гелия из водорода («горение» водорода). А на этой стадии звезда как раз находится на главной последовательности. Каждая следующая стадия синтеза, если она есть, занимает все меньше и меньше времени. Так у звезд с начальной массой 25 масс Солнца, стадия «горения» водорода занимает 7 миллионов лет, а стадия «горения» кремния — всего один день. Стадия формирования звезды занимает также заметно меньше времени (в 10–100 раз меньше), чем время существования звезды. Массивные звезды теряют часть массы в ходе эволюции. Из теоретических соображения ясно, что белые карлики не могут иметь массу более $1,4 M_{\odot}$, самые массивные известные белые карлики имеют массу $1,3 M_{\odot}$. Нейтронная звезда не может иметь массу больше $2,5 M_{\odot}$.

5. Наша Галактика. Другие галактики. Пространственные масштабы наблюдаемой Вселенной.

Наша Галактика называется Млечный путь и состоит из ядра диска, балджа (рис. 7) а также невидимого гало размером в сотни тысяч световых лет, охватывающего всю Галактику. Масса всех звезд Галактики примерно равна триллиону масс Солнца. Большая часть массы сосредоточена в гало размером в сотни тысяч световых лет. Звезды же находятся, в основном, в диске. Диаметр диска составляет около 100 000 световых лет, а толщина — несколько тысяч. Балдж находится в центральной части Галактики, имеет

округлую форму, размеры в несколько тысяч световых лет и в несколько раз легче диска. Там находятся самые старые звезды.

Солнце расположено на расстоянии 25 000–27 000 световых лет от центра Галактики почти точно в плоскости ее диска в местном спиральном рукаве. Оно вращается с периодом 225–250 миллионов лет вокруг центра нашей Галактики (Млечного пути). В центре нашей Галактики находится сверхмассивная черная дыра. Наша Галактика является спиральной галактикой (рис. 8). Бывают также эллиптические, неправильные и линзовидные галактики [8].

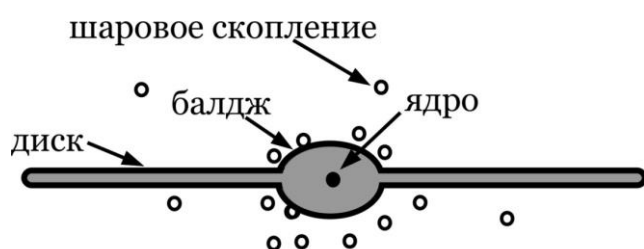


Рис. 7. Схематическое изображение нашей Галактики сбоку.

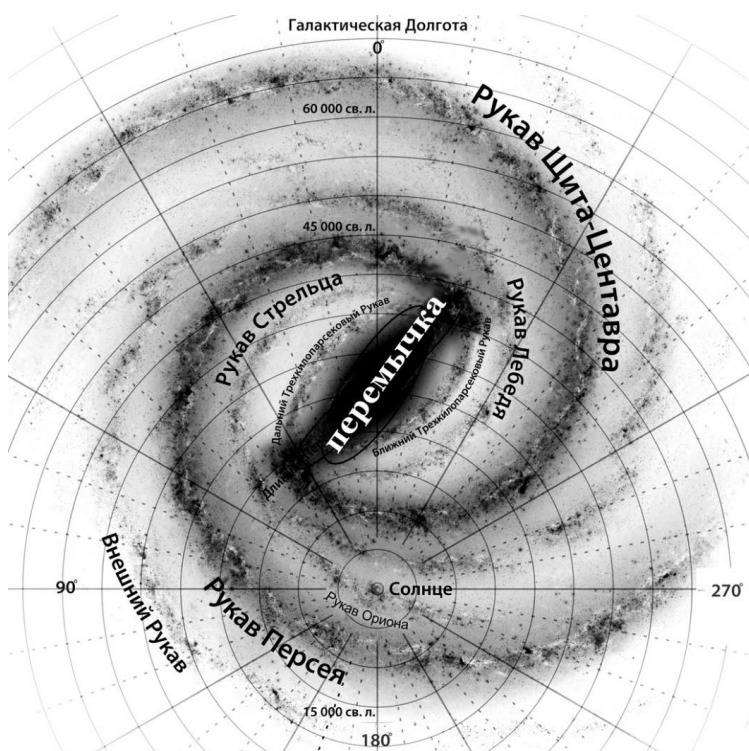


Рис. 8. Схематическое изображение нашей Галактики сверху.

Наша галактика вместе с несколькими другими (Туманность Андромеды, галактика в Треугольнике, Магеллановы Облака и множество карликовых галактик) образуют так называемую Местную группу. Ее размер около 10 миллионов световых лет. Ближайшая крупная галактика Туманность Андромеды находится от нас на расстоянии 2,5 миллионов световых лет. В целом в пределах видимой части Вселенной находятся порядка 100 миллиардов галактик, в каждой из которых до 100 миллиардов звезд.

6. Современные взгляды на строение и эволюцию Вселенной

При обсуждении современных взглядов, надо различать теорию и гипотезу. Гипотеза в физике — это сильное утверждение, это, что объясняет все факты в данной области. Но чтобы стать теорией, гипотеза должна предсказать количественно несколько явлений.

К физическим теориям относится то, что наша Вселенная нестационарна, она существует примерно 13,7 миллиардов лет. Начав с горячего и плотного состояния, Вселенная расширяется. Расширение продолжается до сих пор. Иногда это называют «Большой взрыв». Но русский термин «взрыв» вводит в заблуждение. Расширение Вселенной можно, скорее, сравнить не с взрывом, а с надуванием воздушного шарика. Когда шарик надувается, увеличивается расстояние между любыми точками на его поверхности. Подобное происходит и с объектами Вселенной. Из наблюдений известно, что сейчас Вселенная расширяется с ускорением. А вот по поводу того, что будет с Вселенной дальше, точно неизвестно. На этот счет есть несколько конкурирующих гипотез (замедленное расширение, сжатие, большой разрыв).

Зато общепринятой гипотезой является то, что кроме привычного нам вещества, во Вселенной есть так называемая «тёмная энергия» и «тёмная материя». Согласно этой гипотезе большую часть массы-энергии во Вселенной составляет темная энергия (считается, около $\frac{3}{4}$ всей энергии Вселенной). Это понятие ввели, чтобы объяснить наблюдаемое ускоренное расширение Вселенной. Тёмное вещество или тёмная материя, как считается, даёт основной вклад в массу галактик. На неё, по-видимому, приходится около $\frac{1}{5}$ части массы-энергии наблюдаемой Вселенной. Космологи предположили наличие темного вещества, чтобы объяснить видимое движение звезд. Но пока не удалось получить в лабораторных условиях темное вещество и тем более темную энергию. На обычное же вещество приходится менее 5% массы-энергии, причем около 90% такого вещества распределено в пространстве в виде межгалактического газа.

7. Указания к решению задач по астрофизике (ЕГЭ по физике)

При решении задачи по астрофизике, надо на основании данных из таблицы, выбрать из пяти утверждений некоторое количество правильных. Практически это те же данные, что приведены в таблицах с 1 по 15, и, понятно, что никто не ожидает, что ученик запомнит параметры звезд, планет, астероидов... Ниже приведен пример двух задач с сайта ФИПИ и их решения.

Пример задачи 1. Рассмотрите таблицу, содержащую сведения о ярких звездах

Название звезды	Температура поверхности, К	Масса (в массах Солнца)	Радиус в радиусах Солнца	Плотность по отношению к плотности воды
Альдебаран	3600	5,0	45	$7,7 \cdot 10^{-5}$
ε Возничего В	11 000	10,2	3,5	0,33
Капелла	5200	3,3	23	$4 \cdot 10^{-4}$
Ригель	11 200	40	138	$2 \cdot 10^{-5}$
Сириус А	9250	2,1	2,0	0,36
Сириус В	8200	1	0,01	$1,75 \cdot 10^6$
Солнце	6000	1,0	1,0	1,4
α Центавра	5730	1,02	1,2	0,80

Выберите все утверждения, которые соответствуют характеристикам звёзд.

- 1) Звезда ϵ Возничего В относится к спектральному классу G.
- 2) Солнце относится к звёздам главной последовательности на диаграмме Герцшпрунга – Рассела.
- 3) Звезда Сириус В относится к белым карликам.
- 4) Звезда Сириус В и наше Солнце имеют одинаковые массы, значит относятся к одному спектральному классу.
- 5) Звезда Сириус А является сверхгигантом.

Решение. Утверждение 1 неверно, так как Солнце имеет спектральный класс G и температуру около 6000 К, а температура ϵ Возничего В намного больше. Утверждение 2 верно. Солнце — звезда главной последовательности. Наше Солнце находится в основной части жизненного цикла звезды, что сотни миллионов лет обеспечивает достаточно стабильные условия на Земле. У Сириуса В большая плотность и малый радиус — значит утверждение 3 верно, и Сириус В белый карлик. Утверждение 4 точно неверно, так как масса не определяет спектральный класс. К тому же Сириус В — белый карлик, а его температура (которая определяется спектральным классом, а не массой), заметно больше, чем у Солнца. Утверждение 5 неверно, так как Сириус А имеет радиус всего в 2 раза больше, чем радиус Солнца. У сверхгигантов радиус должен быть раз в 100 больше, чем радиус Солнца.

Ответ 2 4.

Методическое замечание 8. Плотность звезд в таблице приведена в плотностях воды, но может быть в г/см^3 или кг/м^3 . Плотность Солнца того же порядка, что и плотность воды. Как видно из примера решения задачи, обязательно надо знать температуру и спектральный класс Солнца, а также общие характеристики звездных классов и типов звезд (белые карлики, гиганты и сверхгиганты).

Пример задачи 2. Рассмотрите таблицу, содержащую характеристику некоторых астероидов Солнечной системы.

Название астероида	Примерный радиус астероида, км	Большая полуось орбиты а.е.*	Период обращения вокруг Солнца земных лет	Эксцентриситет орбиты e^{**}	Масса, кг
Веста	265	2,36	3,63	0,089	$3,0 \cdot 10^{20}$
Эвномия	136	2,65	4,30	0,185	$8,3 \cdot 10^{18}$
Церера	466	2,78	4,60	0,079	$8,7 \cdot 10^{20}$
Паллада	261	2,77	4,62	0,230	$3,2 \cdot 10^{20}$
Юнона	123	2,68	4,36	0,256	$2,8 \cdot 10^{19}$
Геба	100	2,42	3,78	0,202	$1,4 \cdot 10^{19}$
Аквитания	54	2,79	4,53	0,238	$1,1 \cdot 10^{18}$

Выберите все утверждения, которые соответствуют характеристикам астероидов.

- 1) Астероид Аквитания вращается по более «вытянутой» орбите, чем астероид Церера.
- 2) Орбита астероида Паллада находится между орбитами Марса и Юпитера.
- 3) Большие полуоси орбит астероидов Эвномия и Юнона примерно одинаковы, значит, они движутся по одной орбите друг за другом.

4) Средняя плотность астероида Веста примерно 300 кг/м^3

5) Первая космическая скорость для спутника астероида Геба составляет более 8 км/с .

Решение.

Утверждение 1 верно: чем больше эксцентриситет, тем более «вытянута» орбита.

Утверждение 2 верно. Крупные астероиды (Церера) находятся в главном поясе астероидов, который расположен на орбите примерно от 2 а.е до 3 а.е.

Утверждение 3 неверно, так как, во-первых, орбиту характеризует и большая, и малая полуоси (при одинаковых больших полуосях, для того, чтобы орбиты были одинаковы, нужно, чтобы и малые полуоси были равны), а во-вторых, плоскости орбит небесных тел не совпадают, так что даже две одинаковые орбиты могут быть по-разному расположены в трёхмерном пространстве.

Утверждение 4 неверно, хотя бы потому, что крупные астероиды каменные, и их плотности не могут быть меньше плотности воды. Однако проверим утверждение ($\rho = m/(4/3\pi R^3)$). Получим примерно 3850 кг/м^3 .

Утверждение 5 неверно, так как весьма сомнительно, что бы на небольшом астероиде первая космическая скорость была равна первой космической скорости на Земле. Докажем это, используя формулу (9). Получится примерно 140 м/с .

Ответ 1 2

9. Методическое замечание 9. Как видно из двух примеров, для решения достаточно общих знаний о планетах и звездах. Очень полезно знать основные величины для Земли и для Солнца. Разумеется, надо знать (или уметь выводить) формулы, которые здесь приведены. Поскольку в задачах иногда приходится искать космические скорости, орбитальную скорость, плотности и периоды, необходимы формулы с (1) по (13) и с (15) по (20). Из формулы (14) нужно только понимать, что эксцентриситет — мера вытянутости орбиты. Формулы (24) и (25) достаточно сложно запомнить, но есть простое правило: увеличение на 5 звездной величины означает уменьшение яркости в 100 раз.

Единственная таблица, которую надо знать наизусть — это таблица 11, потому что возможны вопросы о связи спектрального класса и температуры. Довольно полезна таблица 14, потому что могут быть вопросы о звездной эволюции и о гигантах, сверхгигантах и белых карликах. Вопросов на темы галактик и Вселенной еще не было, но стоит исходить из того, что астрофизические вопросы в ЕГЭ были добавлены недавно, и соответствующие вопросы могут появиться.

Обязательная литература

- 1 Мякишев Г. Я., Буховцов Б. Б., Сотский Н. Н. Физика. 10 класс. Любое издание.
- 2 Мякишев Г. Я., Буховцов Б. Б., Чаругин В. М. Физика. 11 класс. Любое издание.
- 3 ЕГЭ. Кодификатор. Демонстрационный вариант. 2020. Издания за все года есть на сайте ФИПИ (fipi.ru).

Дополнительная литература

- 4 Бережной А. А., Бусарев В. В., Ксанфомалити Л. В., Сурдин В. Г., Холшевников К. В. Солнечная система. М: Физматлит, 2017.
- 5 Маров М. Я. Космос: от Солнечной системы до границы Вселенной. М.: Физматлит. 2016.
- 6 Сурдин. В.Г. Звезды. М: Физматлит, 2009.
- 7 Попов С. Б. Краткий путеводитель по пространству и времени: от Солнечной системы до самых далеких галактик и от Большого взрыва до будущего Вселенной. Альпина нон-фикшн. 2018
- 8 Сурдин. В.Г. Галактики. М: Физматлит, 2009.
- 9 Б. А. Воронцов-Вельяминов, Е. К. Страут. Астрономия. 11 класс. М.: Дрофа. 2018